

DOI 10.15589/jnn20160401
УДК 629.5.031.32:533.666
Ш79

EFFECTIVE THRUST OF SHIP PROPULSION KITE

ПОЛЕЗНАЯ ТЯГА СУДОВОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КАЙТА

Volodymyr P. Shostak
volodymyr.shostak@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4745-4734

Aliona I. Kisarova
niilito4ka@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0414-2287

В. П. Шостак,
канд. техн. наук, проф.

А. И. Кисарова,
ассист.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The kite's work in the air stream acting on it, caused by a true wind and course during ship moving, has been considered. Transformation of kite's aerodynamic force in the lift and lateral forces and ship propulsion kite's traction has been represented. It is noted that for ship, which tote a kite, appears an additional water drag. This drag is caused by deviation of rudder from center line to maintain the ship on course, additional list and trim, which caused by the kite traction, because rope is attached to the upper bow of the ship. Useful kite's traction is less than its propulsive traction on the value of the additional drag — has been shown. Here propulsive traction — it's a part of the kite's aerodynamic force in the direction of ship's move. Graphically and analytically useful traction dependence on the speed and angle of an apparent wind applying to the SkySails kite has been represented. This dependence can be used, for example, to solve a number of problems in determining the appropriateness of the kite on the transport ship and to match its main low-speed engines.

Keywords: kite; wind speed; wind angle; additional water drag; useful traction.

Аннотация. Представлена трансформация аэродинамической силы кайта в подъемную и боковую силы и пропульсивную тягу судового кайта. Формализована процедура определения полезной тяги кайта фирмы SkySails.

Ключевые слова: кайт; скорость ветра; углы ветра; дополнительное сопротивление движению судна; полезная тяга.

Анотація. Представлена трансформація аеродинамічної сили кайта в підйомну та бічну сили і пропульсивну тягу судового кайта. Формалізована процедура визначення корисної тяги кайта фірми SkySails.

Ключові слова: кайт; швидкість вітру; кути вітру; додатковий опір руху судна; корисна тяга.

REFERENCES

- [1] *Veter i volny v okeanakh i moryakh* [Wind and waves in the oceans and at seas]. *Spravochnye dannye / Registr SSSR — Reference Data/register USSR*. Moscow, Transport Publ., 1974. 359 p.

- [2] Gofman A. D. *Dvizhitelno-rulevoy kompleks i manevrirovaniye sudna* [The propulsion and maneuverability]. *Spravochnye dannye — Reference Data*. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1988. 360 p.
- [3] *Rukovodstvo po sdvigu vetra na malykh vysotakh. Doc 9817 AN/449/ICAO. Mezhdunarodnaya organizatsiya grazhdanskoj aviatsii*. [Manual wind shear at low altitude. Doc 9817 AN / 449 / ICAO. International Civil Aviation Organization.]. *Izдание pervoe — First edition*, 2005. 258 p.
- [4] Voytkunskiy Ya. V. *Spravochnik po teorii korablya, tom 1* [Reference book on the ship theory, vol. 1]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1986. 768 p.
- [5] Shostak V. P., Manzyuk A. Yu. *Opir dokillia rukhu transportnoho sudna* [Resistance to the environment movement transport vessel]. Mykolaiv, NUOS Publ., 2012. 181 p.
- [6] Shostak V. P., Hershanik V. I., Kot V. P., Bondarenko M. S. *Proektuvannya propul'sivnoi ustanovky suden z priamoiu peredacheiu potuzhnosti na hvynt*. [Design a Marine Propulsive Unit with a Direct-driven Propeller]. *Navchalnyi posibnyk — Textbook*. Mykolaiv, USMTU Publ., 2003. 500 p.
- [7] Shostak V. P., Kisarova A. I. *Raskhod topliva i ekologichnost sudovoy propul'sivnoy ustanovki s kaytom* [Fuel consumption and environmentally ship propulsion plant with a kite]. *Elektronne vydannia «Visnyk Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia» — Bulletin of NUS. Electronic Edition*, 2013, no. 3. Available at: <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/23360/20846>.
- [8] Aschenbeck St., Elsner R., Lenger T., Szczesny W., Emden R. Kreutzer, Schlaak M. Einsatz des SkySails Systems auf der MS «Beaufort»: *Institut für Angewandte Wirtschaftsforschung und Regionalanalyse ANWI; Institut für Seefahrt Leer*, 2007. 5 p.
- [9] Aschenbeck S., Lenger T., Szczesny W., Kreutzer R., Schlaak M. Testergebnisse des SkySails — Systems. In: *Schiffbau & Schiffstechnik*, Heft 1, 1/2009, P. 36–40.
- [10] Dadd G.M. Kite Dynamics for Ship Propulsion. Degree of Doctor of Engineering. *University of Southampton*, 2013, 215 p.
- [11] Elsner R., Schlaak M., Kreutzer R. Simulating possible Savings of the SkySails-System on International Merchant Ship Fleets. In: *Journal of Marine Engineering and Technology*, 2010.
- [12] Schnackenberg T. Sky sails — Vessel Propulsion using Kites. *20-th International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction. Amsterdam RAI Convention Centre*, 17 November 2008, 11 p.
- [13] *SkySails. Turn Wind into profit*. Available at: <http://www.skysails.info>.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Недавно в мировом флоте появилось новое дополнительное тяговое устройство — буксирующий пропульсивный воздушный змей (кайт), позволяющий при благоприятных гидрометеорологических условиях включать его в работу и тем самым снижать расход топлива на главный двигатель (ГД), используя энергию ветра.

Целесообразность применения пропульсивного кайта, определяемая при проектировании судна, рациональная настройка ГД, например малооборотного дизеля (МОД), связаны с расчетами тяги кайта, которая зависит как от его площади, так и от силы и направления ветра. Это предопределяет расчленение аэродинамической (ветровой) силы кайта на подъемную, боковую и пропульсивную силы, что составляет определенную проблему на данном этапе теории и практики использования энергии ветра на судах.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Площади пропульсивных кайтов, создаваемых, например, ведущей компанией SkySails, достигают более 600 м², а их тяга становится соизмеримой с тя-

гой гребного винта (ГВ) среднетоннажного морского судна [2, 3, 7–13]. Для принятия проектных решений по пропульсивному комплексу «главный двигатель — гребной винт + кайт», для соответствующих расчетов и формирования программы по управлению кайтом необходимы данные, позволяющие определять пропульсивную тягу кайта, чему посвящено немало публикаций, в частности [7–12]. Вместе с тем ряд вопросов, прежде всего методологического и терминологического характера, нуждается в более глубоком изучении и освещении — желательно с достаточно ясной наглядной иллюстрацией.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — установить взаимосвязь между аэродинамической силой кайта и его полезной тягой и формализовать процедуру определения этой тяги.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Поддержание фиксированного заданного курса судна обеспечивается слаженной работой комбинированного пропульсивного комплекса «ГД – ГВ + К» и системы рулевого управления. При благоприятном ветре (по скорости и направлению) на высоту 200...400 м воспаряет кайт и своим движением в воздухе описывает некоторую траекторию циклично.

Поднятый на судне кайт изменяет маневренные характеристики и сопротивление движению судна из-за отклонения пера руля от диаметральной плоскости и крена, обусловленного, прежде всего, нестабильной боковой тягой каната.

Кайт работает как движущееся в воздушном потоке буксирующее крыло [7], прикрепленное к тросу (канату), который, в свою очередь, закреплен в носовой части судна. Дополнительное сопротивление движению судна, возникающее при работе кайта — это сопротивление, которое вызывается рысканьем судна вследствие циклового характера движения кайта, отклонением от диаметральной плоскости пера руля для сохранения курса судна, креном и дифферентом от боковой и вертикальной составляющей силы натяжения буксирующего каната.

В отличие от парусов, использующих поверхностную силу ветра, кайт работает на больших высотах, на которых скорость и направление ветра более стабильны [3]. С целью получения максимальной тяги кайт движется по траектории напоминающей цифру

восемь. Для кайтов фирмы SkySails максимальный размах составляет 250 метров в ширину и 50 метров в высоту [13].

Энергия ветра через движение кайта трансформируется в силу, способствующую движению судна. В соответствии с принятым в аэродинамике разложением сил схема этой трансформации осуществляется последовательно в некоторый фиксированный момент времени. Сначала определяются векторы сил в системе координат, связанной непосредственно с кайтом. Кайт, как крыло в воздушном потоке, воспринимает действие ветра, порождающее аэродинамическую (ветровую) силу кайта, вектор которой F_A (рис. 1, а). Этот вектор в общем случае не лежит в вертикальной плоскости, проходящей через канат. Поэтому кайт движется вбок, на рис. 1, а влево, так что аэродинамическая сила разлагается на боковую силу (F_B) и тягу (P_K) кайта — в плоскости боковой и аэродинамической сил. Тяга P_K обуславливает подъемную силу кайта F_{Π} , удерживающую его на определенной высоте, и натяжение каната с силой F_K ; векторы этих

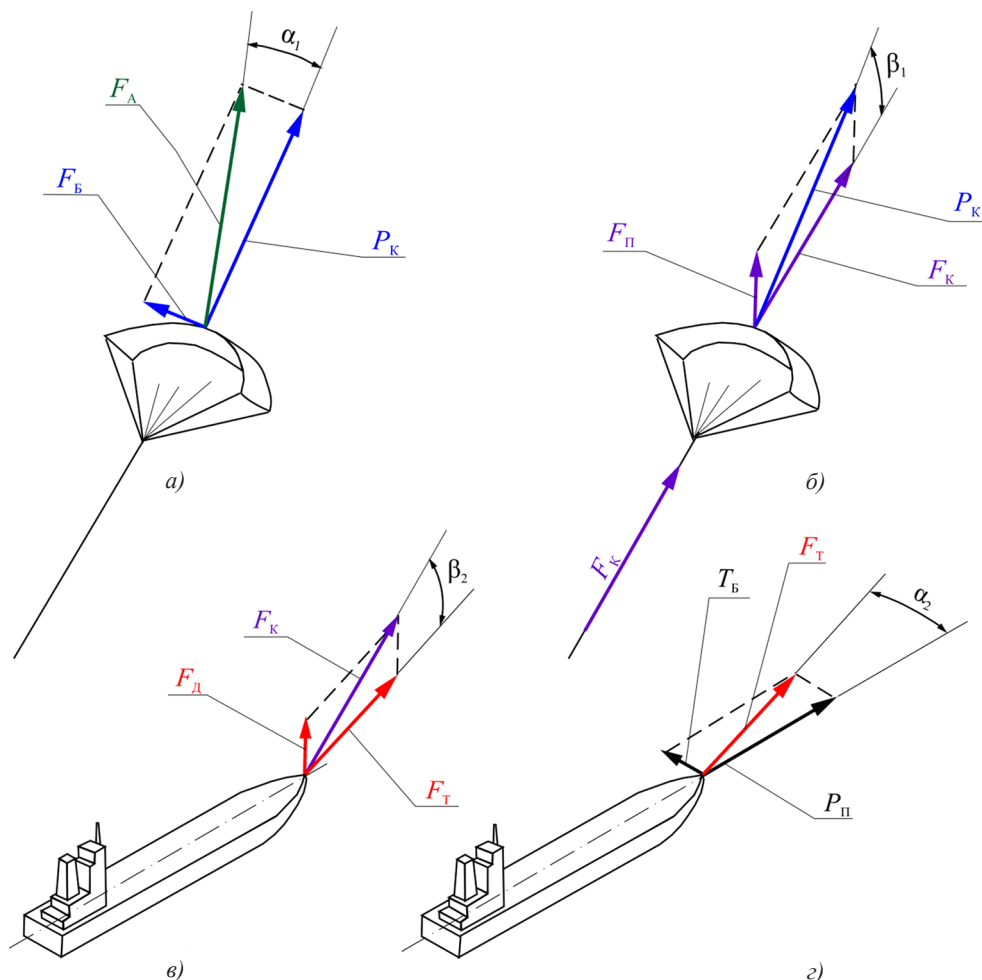


Рис. 1. Разложение вектора равнодействующей аэродинамической силы кайта F_A : а) в плоскости аэродинамической силы и боковой силы; б, в) в вертикальной плоскости каната; г) в горизонтальной плоскости носа судна

сил лежат в вертикальной плоскости (рис. 1,б). В статическом положении сила F_{Π} по модулю равна весу каната с кайтом и оборудованием.

В системе координат, связанной с точкой крепления каната на судне, сила F_K разлагается на вертикальную силу — силу дифферента F_D и горизонтальную тягу кайта F_T (рис. 1,в), как правило, не совпадающую с направлением движения судна. Векторы этих сил лежат в вертикальной плоскости, проходящей через канат. Сила F_D , как подчеркивает фирма-производитель SkySails, уменьшает влияние слемминга.

Горизонтальная сила F_T тянет судно вперед и вбок (на рис. 1,г влево) соответственно с пропульсивной тягой P_{Π} — горизонтальной по направлению движения судна, и с горизонтальной боковой T_B — боковой тягой кайта. Для поддержания судна на заданном курсе тяга T_B компенсируется боковой силой, возни-

кающей при соответствующем отклонении пера руля от диаметральной плоскости, что вызывает дополнительное сопротивление движению судна. Сила P_{Π} среди указанных сил является определяющей в пропульсии судна.

На рис. 1 также указаны наиболее характерные углы α и β между отдельными векторами сил.

На рис. 2 изображено судно, несущее кайт, с указанием векторов сил и характерных углов в соответствии с рис. 1. Слева вверху представлены в горизонтальной плоскости скорости ветра: истинного $V_{И}$, курсового V_K и мнимого V_M , их направления по отношению к «норду» N^* (углы $q_{И}$, q_K и q_M) и курсу судна (угол мнимого ветра q_{C-B}).

Справа внизу изображена укрупненная схема действующих на судно сил: тяги гребного винта $T_{ГВ}$,

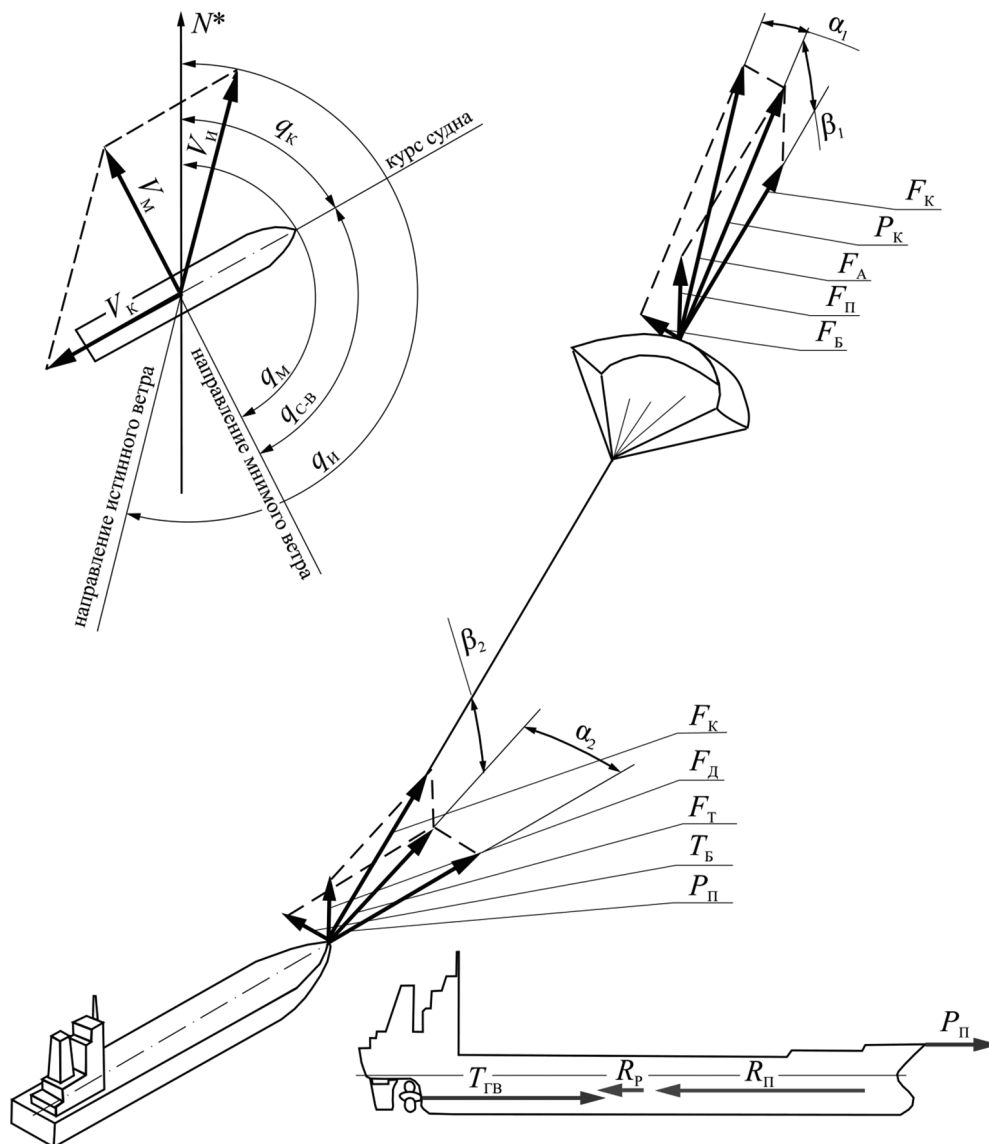


Рис. 2. Скорости (V) и углы (q) ветра, векторы сил (F , P , T), углы между отдельными векторами (α , β) и сопротивления движению (R) судна с кайтом

пропульсивной тяги кайта P_{Π} , «полного расчетного» сопротивления движению R_{Π} и дополнительного сопротивления R_p вследствие отклонения пера руля от диаметральной плоскости, обусловленного рысканием судна из-за циклического движения кайта и боковой тяги его каната [4, 5]. При постоянной скорости хода судна, согласно этой схеме,

$$T_{ГВ} + P_{\Pi} = R_{\Pi} + R_p$$

Поскольку полезная тяга судового пропульсивного кайта представляет собой его пропульсивную тягу за вычетом указанного дополнительного сопротивления, т.е.:

$$T_{\Pi} = P_{\Pi} - R_p$$

то необходимая для поддержания указанной скорости тяга гребного винта определяется как

$$T_{ГВ} = R_{\Pi} + R_p - P_{\Pi} = R_{\Pi} - (P_{\Pi} - R_p) = R_{\Pi} - T_{\Pi}$$

(При отсутствии кайта $T_{ГВ} = R_{\Pi}$).

Как известно, ветер (воздушный поток) имеет не постоянную скорость. В порывах его скорость может в полтора-два раза и более превышать ее среднее значение. В литературе [1 и др.], как правило, приводятся обобщенные сведения именно о средней скорости ветра. Эти обстоятельства существенно усложняют расчет динамических, геометрических и тяговых характеристик кайта. И даже при использовании аэродинамических коэффициентов подъемной силы, лобового сопротивления и др., полученных экспериментальным путем, такие расчеты применительно к судовым условиям остаются, по своей природе, приближенными с трудно определяемой степенью достоверности. Основная сложность расчета и информации, заложенной в программу управления кайтом, заключается в том, что помимо непрерывного изменения траектории, углов атаки и скорости движения кайта его аэродинамический профиль меняет форму по определенному закону, существенно влияющему на все аэродинамические характеристики [8–12].

Для упрощения в практических расчетах группой ученых институтов прикладных экономических исследований и регионального анализа ANWI Institut für Seefahrt Leer в Эдмонтоне был осуществлен переход от «мгновенной» тяги кайта к среднеинтегральной за законченный цикл движения по траектории, напоминающей цифру восемь, при постоянных ветре и ходе судна [7, 8]. Компания SkySails предоставила [9] для расчетов пропульсивной тяги кайта P_{Π} , в кН, обобщающую теоретическо-эмпирическую формулу

$$P_{\Pi} = AV_M^p \cos \alpha_2 \cos \beta_2,$$

где A — эмпирический аэродинамический коэффициент, учитывающий площадь и ряд конструктивных особенностей кайта; V_M — средняя скорость

действующего (мнимого) ветра, м/с; p — эмпирический коэффициент, учитывающий траекторию движения кайта и иные динамические особенности тяговой системы; α_2 и β_2 — осредненные углы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, рад.

Значения коэффициентов A и p определяются для каждой марки кайта. Проблемным является определение углов α_2 и β_2 .

В докладе «SkySails — движение судов с использованием кайта» [12] на XX международном симпозиуме HISWA, в 2008 году, была представлена функциональная зависимость средней удельной полезной тяги кайта от скорости и угла мнимого ветра, базирующаяся на теоретических исследованиях и натурных испытаниях, которая изображена на рис. 3,а. В соответствии с этими данными была построена зависимость полезной тяги судового пропульсивного кайта площадью 160 м² от угла между курсом судна и направлением мнимого ветра при разной его скорости (рис. 3,б). Здесь идет речь о среднеинтегральных значениях тяги и скорости.

Такие сведения позволяют легко определять полезную тягу кайта. На этом рисунке проиллюстрировано определение такой тяги при скорости мнимого ветра 14,5 м/с и его угле по отношению к курсу судна 135°; удельная тяга составляет 0,563 кН/м², а абсолютная 92 кН.

Зависимость удельной полезной тяги кайта, изображенная на рис. 3, аппроксимируется следующим уравнением (полиномом четвертой степени):

$$t_{\Pi} = \frac{1}{160} (a_1 + a_2 q_{C-B} + a_3 q_{C-B}^2 + a_4 q_{C-B}^3) = \frac{1}{160} \sum_{i=1}^4 a_i q_{C-B}^{i-1},$$

где t_{Π} — в кН/м², V_M — в м/с и q_{C-B} в град.

При $V_M = 4 \dots 24$ м/с коэффициент детерминации R^2 будет не меньше 0,991, а при $V_M = 3$ м/с он будет равен 0,984. Коэффициенты этого полинома следующие:

V_M , м/с	a_1	a_2	a_3	a_4
3	7,3	-0,451	0,00753	-0,0000293
4	1,1	-0,274	0,00628	-0,0000234
5	-2,4	-0,183	0,00594	-0,0000202
6	-1,7	-0,265	0,00775	-0,0000256
8	-2,1	-0,366	0,01077	-0,0000359
10	-4,2	-0,389	0,01278	-0,0000435
12	-6,3	-0,387	0,01429	-0,0000494
14	-8,7	-0,367	0,01546	-0,0000541
16	-11,1	-0,339	0,01642	-0,0000582
18	-13,5	-0,306	0,01725	-0,0000618
20	-15,9	-0,273	0,01799	-0,0000650
22	-18,1	-0,240	0,01866	-0,0000680
24	-20,3	-0,208	0,01929	-0,0000708

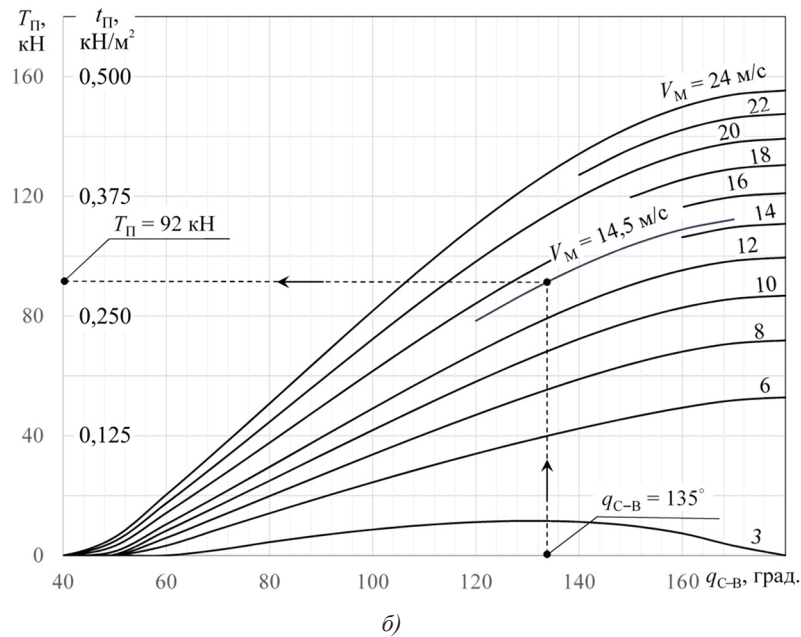
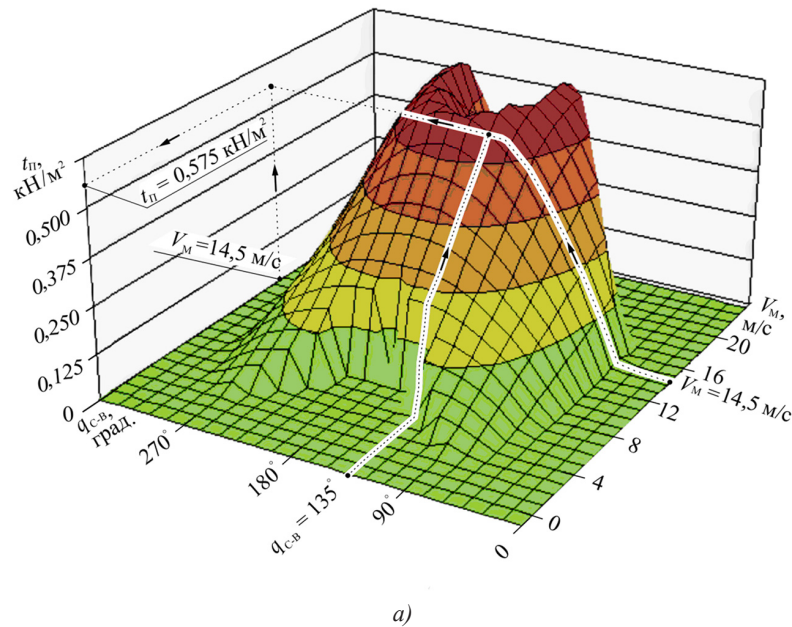


Рис. 3. Зависимость полезной тяги кайта от скорости (V_M) и угла (q_{c-b}) мнимого ветра:

а) удельной t_{Π} ; б) абсолютной T_{Π} и удельной t_{Π} для кайта SKS 160

Применение зависимости $P_{\Pi} = f(V_M, q_{c-b})$, представленной в графическом и аналитическом виде, имеет определенные рамки в соответствии с ее степенью толерантности. Она может, по нашему мнению, использоваться при решении ряда задач, когда устанавливается целесообразность применения кайта, например, на транспортном судне, или определяется параметр настройки его главного малооборотного двигателя.

ВЫВОДЫ. 1. Произведена трансформация аэродинамической силы кайта в силу для движения судна. 2. Установлено, что с включением в работу пропульсивного кайта появляется дополнительное сопротивление движению судна по намеченному курсу, и поэтому при определении полезной тяги кайта следует учитывать это обстоятельство. 3. Формализована процедура определения полезной тяги кайта с помощью графической или аналитической зависимости, в которой аргументами выступают средняя скорость и угол мнимого ветра.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ветер и волны в океанах и морях [Текст]: справочные данные / Регистр СССР. — М. : Транспорт, 1974. — 359 с.
- [2] **Гофман, А. Д.** Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна [Текст] : справочник. — Л. : Судостроение, 1988. — 360 с.
- [3] Руководство по сдвигу ветра на малых высотах [Текст] : Doc 9817 AN/449 / ИКАО. Международная организация гражданской авиации. Утверждено Генеральным секретарем и опубликовано с его санкции. — Издание первое, 2005. — 258 с.
- [4] Справочник по теории корабля [Текст] : Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / под ред. Я. И. Войткунского. — Л. : Судостроение, 1985. — 768 с.
- [5] **Шостак, В. П.** Опір доквілля руху транспортного судна: [Текст] : навчальний наочний посібник / В. П. Шостак, А. Ю. Манзюк. // Видавництво НУК. — Миколаїв, 2012. — 181 с.
- [6] **Шостак, В. П.** Проектування пропульсивної установки суден з прямою передачею потужності на гвинт [Текст] : навч. посіб. / В. П. Шостак, В. І. Гершанік, В. П. Кот, М. С. Бондаренко. — Миколаїв : УДМТУ, 2003. — 500 с.
- [7] **Шостак, В. П.** Расход топлива и экологичность судовой пропульсивной установки с кайтом [Текст] : В. П. Шостак, А. И. Кисарова // Вісн. НУК (електронне вид.). — Миколаїв, 2013. — № 3.
- [8] **Aschenbeck, S.** Einsatz des SkySails Systems auf der MS «Beaufort» [Text]: S. Aschenbeck, R. Elsner, T. Lenger, W. Szczesny, Emden R. Kreutzer, M. Schlaak: Institut für Angewandte Wirtschaftsforschung und Regionalanalyse ANWI; Institut für Seefahrt Leer. — 2007. — 5 p.
- [9] **Aschenbeck, S.** Testergebnisse des SkySails — Systems [Text]: S. Aschenbeck, T. Lenger, W. Szczesny, R. Kreutzer, M. Schlaak: In: Schiffbau & Schiffstechnik, Heft 1, 1/2009. — P. 36–40.
- [10] **Dadd, G.M.** Kite Dynamics for Ship Propulsion [Text]: Degree of Doctor of Engineering / George Michael Dadd. — University of Southampton — 2013. — 215 p.
- [11] **Elsner, R.** Simulating possible Savings of the SkySails-System on International Merchant Ship Fleets [Text]: R. Elsner, M. Schlaak, R. Kreutzer : Trans RINA, Vol. 151, Part A4, Intl J Maritime Eng, Oct–Dec 2009. — P. 25–37.
- [12] Sky sails — Vessel Propulsion using Kites. [Text]: 20-th International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction. Amsterdam RAI Convention Centre / Tom Schnackenberg — 17 November 2008. — 11p.
- [13] SkySails. Turn Wind into profit [Електрон. ресурс]. — Режим доступа: <http://www.skysails.info>.

© В. П. Шостак, А. І. Кісарова

Надійшла до редколегії 25.07.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *М. І. Радченко*